

Caractérisation spectrale du crissement de freins à disques

Pierre Grange, David Clair & Michel Fogli

Laboratoire de Mécanique et Ingénieries
Institut Français de Mécanique Avancée et Université Blaise Pascal
Campus des Cézeaux
BP 265
63175 Aubière Cedex France
pierre.grange@ifma.fr

Résumé :

Les freins à disques comptent parmi les nombreux mécanismes concernés par les problèmes complexes de vibrations induites par frottement. Conséquences de ces instabilités, les bruits de freinage tels le crissement font l'objet de nombreux travaux de recherche depuis le début du 20^{ème} siècle. Nous proposons dans cet article d'utiliser des outils du traitement du signal pour étudier ce phénomène. Notre démarche s'appuie sur la connaissance d'échantillons expérimentaux de plusieurs paramètres (pression acoustique, vitesse et force tangentielle). L'analyse spectrale de ces signaux, portant sur l'estimation de leur densité spectrale de puissance, permet d'accéder à l'information dynamique des différents signaux et notamment de caractériser une phase crissante de freinage. Une analyse temps-fréquence est également réalisée afin d'étudier l'évolution temporelle du contenu spectral. Cette analyse spectrale nous conduit à définir un nouveau paramètre caractéristique du crissement. Elle constitue le préalable à la modélisation stochastique du phénomène, prochaine étape de l'étude.

Abstract :

Discs brakes are among the numerous mechanisms concerned by the problems of friction-induced vibrations. Consequences of these instabilities, braking noises as squeal are the subject of many research works since the beginning of the 20th century. In this paper, we propose to use signal processing's tools in order to study this phenomenon. Our approach depends on knowledge of experimental samples of several parameters (acoustic pressure, speed and tangential force). The spectral analysis of these signals, bearing upon the estimation of their power spectral density, enables to access to information about the dynamics of different signals and notably to characterize a squealing phase of braking. A time-frequency analysis is also performed to study the temporal evolution of spectral content. This spectral analysis leads to define a new characteristic parameter of squeal. It constitutes the preamble to the stochastic modeling of this phenomenon, next step of the study.

Mots-clefs :

squeal ; power spectral density ; time-frequency analysis

1 Introduction

Le problème du comportement dynamique des freins à disque a fait l'objet d'un grand nombre de travaux, que ce soit par des approches expérimentales, théoriques ou numériques [Kinkaid *et al.* (2003)]. Malgré tout, les vibrations induites par frottement et les nuisances sonores associées comme le crissement restent mal comprises. Des études tribologiques ont souligné l'importance du frottement, de l'interface plaquette/disque ou bien encore du troisième corps dans le déclenchement du crissement [Linck (2005)]. Plus récemment, des modélisations par éléments finis du contact plaquette/disque ont été réalisées [Baillet (2006)], permettant ainsi d'analyser l'influence de plusieurs paramètres comme les imperfections géométriques du disque, la vitesse relative de glissement ou encore la pression normale sur l'apparition des instabilités.

Toutefois, alors que de nombreux auteurs font état de la nature aléatoire du phénomène de crissement, peu de chercheurs ont abordé le problème de ce point de vue. Ibrahim et Qiao ont développé, à partir d'un modèle analytique et de résultats expérimentaux, des modèles stochastiques linéaire et non linéaire de vibrations induites par frottement de freins à disque [Qiao *et al.* (1999)]. Il en résulte que les forces de contact sont aléatoires, non stationnaires et essentiellement non gaussiennes. Cependant, la relative simplicité du modèle analytique ne peut pas prendre en compte toute la complexité du phénomène. Face à celle-ci et à la nécessité de mieux comprendre le phénomène de crissement, nous proposons une démarche qui vise, dans un premier temps, à mener une analyse statistique des signaux expérimentaux disponibles puis, dans un second temps, à construire un modèle stochastique à partir de l'information statistique identifiée dans ces derniers.

Nous nous limitons dans cet article à une présentation succincte de la première étape de cette démarche. Nous procédons tout d'abord à une analyse spectrale basée sur des estimations de densités spectrales de puissance et de fonctions de cohérence. Nous réalisons ensuite une analyse temps-fréquence des signaux. Il s'agit à travers cette étude, non seulement de mieux comprendre le phénomène de crissement, mais également d'en détecter les caractéristiques essentielles en vue de la construction envisagée d'un modèle stochastique.

2 Analyse expérimentale

Les essais de crissement ont été réalisés sur le tribomètre pion/disque du Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS) de l'INSA de Lyon. Cet appareil est constitué d'un disque massif dont la vitesse de rotation varie de 10 à 50tr/mn. Il permet de simuler un freinage par la mise en charge d'une plaquette fixe sur un disque. La force de frottement, la vitesse de la face avant de la plaquette et la pression acoustique sont mesurées durant les essais. Ils constituent les paramètres de l'étude. Les figures 1 et 2 représentent les différents signaux mesurés pour une vitesse de rotation de 10tr/mn. Les signaux de pression acoustique et de vitesse sont caractérisés par une succession de deux régimes stationnaires distincts : un régime de faible amplitude correspondant à une zone non crissante et un régime d'amplitude élevée caractéristique d'une zone crissante. La force tangentielle présente également deux régimes stationnaires qui se distinguent par la valeur absolue de leur valeur moyenne, plus faible pour une phase crissante, traduisant ainsi une baisse du coefficient de frottement global.

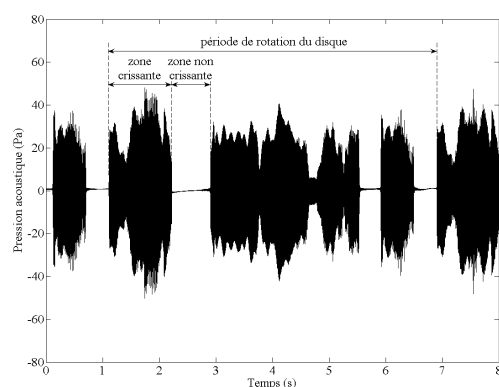


FIG. 1 – Pression acoustique (10tr/mn)

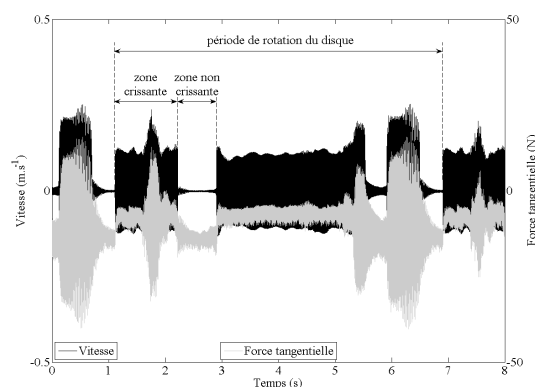


FIG. 2 – Vitesse et force tangentielle (10tr/mn)

Ainsi, les historiques des paramètres mesurés sont composés d'une succession de phases crissantes et non crissantes où la transition d'une phase à une autre est extrêmement rapide. Des travaux expliquent le déclenchement du crissement par la présence, au niveau du contact pla-

quette/disque, de zones localement glissantes, adhérentes ou décollées conduisant aux cycles de type adhérence-glissement ou adhérence-glissement-décollement, caractéristiques d'un état instable. Toutefois, même si le système est dans un régime stationnaire d'un point de vue global, les instants de déclenchement et d'arrêt des instabilités varient d'un tour de disque à un autre révélant ainsi le caractère stochastique du phénomène de crissement.

Lors de cette analyse expérimentale, nous avons constaté que le passage d'un régime non crissant à un régime crissant était accompagné par un changement de l'amplitude de la pression acoustique ou de la vitesse de la face avant de la plaquette ou par un changement de la valeur moyenne de la force de frottement. Cependant, ces changements peuvent être la conséquence de phénomènes différents du crissement et ne permettent pas de distinguer de manière robuste une phase crissante d'une phase non crissante. La suite de l'article présente plusieurs outils de l'analyse spectrale ainsi que leurs intérêts dans la caractérisation du crissement, notamment par l'étude des liens qui peuvent exister entre les paramètres mesurés.

3 Analyse spectrale

L'objectif est ici d'obtenir des informations qualitatives sur la dynamique du système, et notamment son évolution lors du passage d'une zone non crissante à une zone crissante, à partir d'une analyse du contenu spectral des paramètres expérimentaux.

3.1 Densité spectrale de puissance et fonction de cohérence

Nous notons $Z = (f, v, p)^T$ le processus tridimensionnel formé par le regroupement de la force tangentielle f , la vitesse de la face avant de la plaquette v et la pression acoustique p . Il s'agit d'un processus multi-états dont la description mathématique rigoureuse reste à trouver. Pour l'instant, nous appuyant sur l'information statistique disponible, nous nous contentons de le considérer comme un processus ayant deux comportements distincts selon qu'il décrit le triplet (f, v, p) sur une zone non crissante ou crissante. Il est stationnaire sur chacune de ces zones, mais n'est pas centré, sa coordonnée f ne l'étant pas. Nous commençons donc par le centrer et, pour ne pas multiplier les notations, nous notons encore Z le processus centré associé. Soit S_Z sa densité spectrale de puissance (DSP). C'est une fonction à valeurs dans $\mathbb{C}^{3 \times 3}$ que nous avons estimée en utilisant l'estimateur de Welch muni de la fenêtre de Hamming [Soize (2000)]. A cette DSP est associée la fonction de cohérence FC_Z de Z , ces deux grandeurs étant telles que :

$$S_Z = \begin{bmatrix} S_{f,f} & S_{f,v} & S_{f,p} \\ S_{v,f} & S_{v,v} & S_{v,p} \\ S_{p,f} & S_{p,v} & S_{p,p} \end{bmatrix}, \quad FC_Z = \begin{bmatrix} FC_{f,f} & FC_{f,v} & FC_{f,p} \\ FC_{v,f} & FC_{v,v} & FC_{v,p} \\ FC_{p,f} & FC_{p,v} & FC_{p,p} \end{bmatrix}, \quad FC_{Z_i, Z_j} = \frac{|S_{Z_i, Z_j}|}{\sqrt{S_{Z_i, Z_i} S_{Z_j, Z_j}}}$$

Les figures 3 et 4 représentent les DSP estimées à partir des différents signaux expérimentaux respectivement en zone non crissante et crissante pour une vitesse de rotation de 10tr/mn. Quelque soit la zone considérée (crissante ou non), la DSP est estimée sur la totalité de la zone. La DSP de la force tangentielle diffère très peu d'une zone non crissante à une zone crissante. Seul un pic de faible amplitude à une fréquence appelée fréquence de crissement, notée F_{cr} , égale à environ 19,7kHz apparaît lors du crissement. En revanche, $S_{p,p}$ et $S_{v,v}$ présentent des différences importantes. En zone non crissante, les spectres de la pression acoustique et de la vitesse sont relativement plats et de valeur faible ; en zone crissante, les deux spectres sont marqués par un pic assez large centré sur la fréquence de crissement F_{cr} .

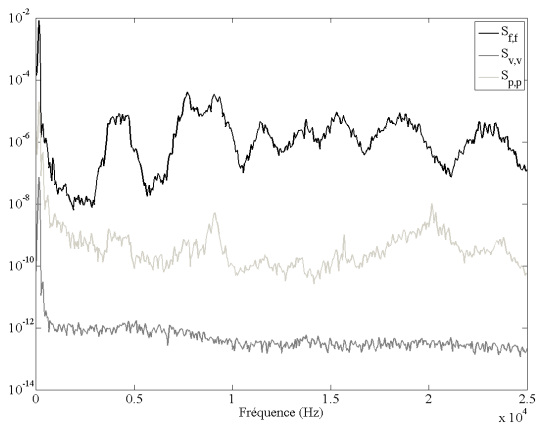


FIG. 3 – DSP en zone non crissante

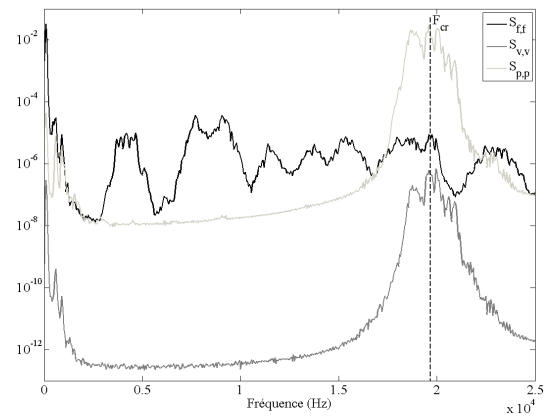
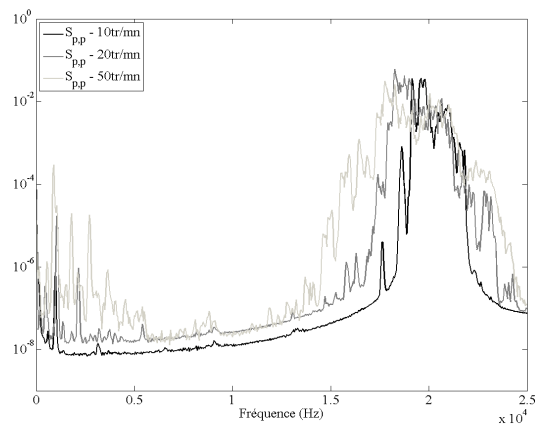


FIG. 4 – DSP en zone crissante

L'augmentation de la vitesse de rotation du disque tend à élargir ce pic caractéristique du crissement (Figure 5).

FIG. 5 – DSP de la pression acoustique $S_{p,p}$ pour différentes vitesses de rotation du disque

L'analyse de $FC_{p,f}$ (Figure 6) montre que la pression acoustique n'est que très légèrement corrélée à la force, excepté dans une petite bande de fréquence autour de F_{cr} . Le lien entre la vitesse de la face avant de la plaquette et la pression acoustique, plus complexe, est caractérisé par un niveau moyen de corrélation élevé (Figure 6). De plus, toutes les fonctions de cohérence présentent un contenu spectral très différent de $S_{p,p}$.

Afin d'essayer de caractériser le crissement sans utiliser le signal de pression acoustique, nous définissons un paramètre énergétique de crissement, noté d et qui est égal au produit de la force tangentielle f par la vitesse de la face avant de la plaquette v . La figure 7 compare la DSP de la pression acoustique $S_{p,p}$ à la DSP du paramètre énergétique de crissement $S_{d,d}$ à une vitesse de 10tr/mn. Nous constatons que la distribution d'énergie du paramètre d est proche de celle de la pression acoustique mais avec un niveau plus faible dans la plage caractéristique du crissement. Ceci révèle un lien physique très net entre le paramètre d et la pression acoustique qui n'apparaît pas de manière évidente lorsque nous traitons séparément la force tangentielle et la vitesse de la face avant de la plaquette. Par conséquent, le paramètre énergétique de crissement contient une information spectrale semblable à celle du paramètre de pression acoustique et présente donc un intérêt pour établir un critère robuste dans la détection et la caractérisation du crissement.

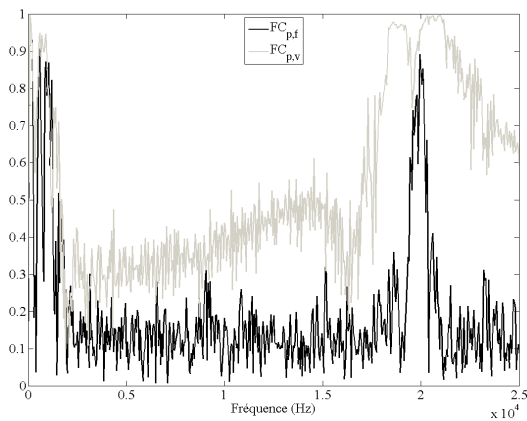


FIG. 6 – Fonctions de cohérence pression/force $FC_{p,f}$ et pression/vitesse $FC_{p,v}$ à 10tr/mn

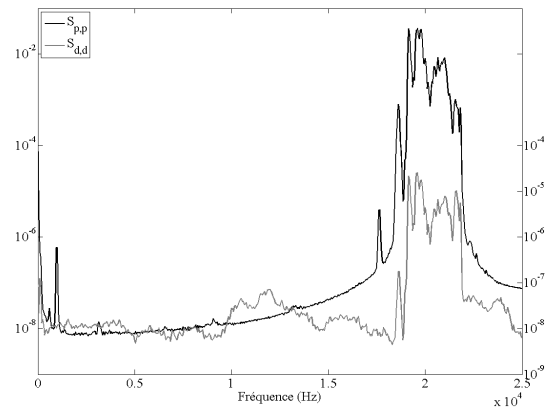


FIG. 7 – DSP de la pression acoustique $S_{p,p}$ et du paramètre énergétique de crissement $S_{d,d}$

3.2 Analyse temps-fréquence

Afin d'affiner les résultats de l'analyse spectrale et d'étudier l'évolution temporelle du contenu spectral des différents signaux, nous effectuons une analyse temps-fréquence. Ce type d'analyse est très largement utilisé dans plusieurs domaines scientifiques mais n'a été que très récemment appliqué aux vibrations induites par frottement [Chen *et al.* (2007)]. De nombreuses méthodes sont utilisées, les plus classiques étant la Transformée de Fourier à Court Terme, la Transformation de Wigner Ville ou bien encore la Transformation de Choi-Williams [Thirion-Moreau *et al.* (2002)]. Nous utilisons ici une représentation temps-fréquence quadratique, le spectrogramme, correspondant au module carré de la transformation de Fourier à court terme, avec la fenêtre de Hamming comme fenêtre d'analyse.

Les figures 8 et 9 présentent respectivement l'analyse temps-fréquence de la pression acoustique et du paramètre énergétique de crissement. Chaque figure présente la trajectoire expérimentale du paramètre, sa DSP ainsi que sa représentation temps-fréquence.

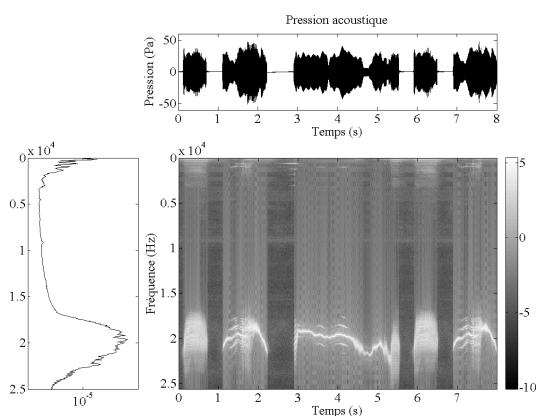


FIG. 8 – Analyse temps-fréquence de la pression acoustique

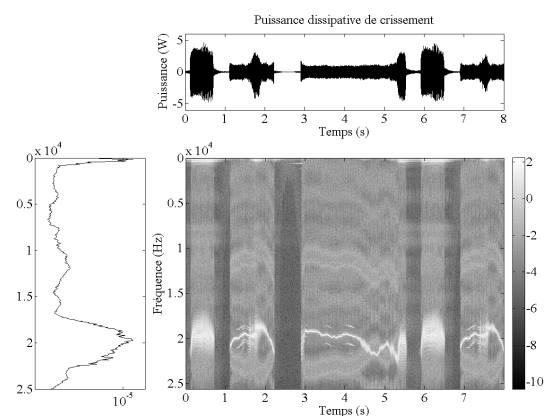


FIG. 9 – Analyse temps-fréquence du paramètre énergétique de crissement

Les zones crissantes sont caractérisées par un contenu spectral localisé autour de la fréquence de crissement $F_{cr} = 19,7kHz$. Sur ces zones, la fréquence de crissement évolue au cours du temps, traduisant ainsi la complexité du comportement dynamique du système plaque/disque et la présence de non linéarités. De plus, la séparation entre les zones crissantes

et non crissantes est très nette, les dernières étant caractérisées par des bandes sombres. Enfin, outre le fait que le contenu spectral de la puissance dissipative soit très proche de celui de la pression acoustique, l'analyse temps-fréquence nous montre également que l'évolution temporelle du contenu spectral de ces deux paramètres est semblable, soulignant ainsi la robustesse du paramètre énergétique de crissement d comme paramètre caractéristique du crissement.

4 Conclusions

Nous venons de présenter une méthode d'analyse spectrale du phénomène de crissement basée sur l'estimation des densités spectrales de puissance de trois paramètres expérimentaux ainsi que sur une analyse temps-fréquence de ceux-ci. Cette étude a mis en évidence les changements importants du contenu spectral de la pression acoustique et de la vitesse de la face avant de la plaquette lors du passage d'une zone non crissante à une zone crissante. L'analyse des différentes fonctions de cohérence nous a permis d'étudier la corrélation entre les paramètres expérimentaux dans le domaine fréquentiel. Elle nous a également conduit à définir un paramètre énergétique caractéristique du crissement mieux à même que les précédents de détecter les zones crissantes. La prochaine étape sera de construire, sur la base de ces résultats, un modèle probabiliste (i.e. un processus stochastique) capable de décrire la complexité de ce phénomène. L'élaboration d'un tel modèle est à l'étude au LaMI à l'heure actuelle.

Remerciements

Les mesures expérimentales ont été réalisées par C. Vayssière du LaMCoS de l'INSA de Lyon. Ce travail s'effectue dans le cadre de la Fédération de Recherche TIMS, financée par le Conseil Régional d'Auvergne, le ministère français de la recherche, le CNRS et le Cemagref.

Références

- Baillet, L., D'Errico, S., Laulagnet, B. 2006 Understanding the occurrence of squealing noise using the temporal finite element method. *Journal of Sound and Vibration* **292** 443-460
- Chen, G.X., Zhou, Z.R. 2007 Time-frequency analysis of friction-induced vibration under reciprocating sliding conditions. *Wear* **262** 1-10
- Clair, D., Grange, P., Fogli, M., Daucher, D., Berthier, Y. 8-9 novembre 2006 A stochastic analysis of squeal. *5th European Conference on Braking JEF2006*, Lille (France), pp.381-388.
- Kinkaid, N.M., O'Reilly, O.M., Papadopoulos, P. 2003 Automotive disc brake squeal. *Journal of Sound and Vibration* **267** 105-166
- Linck, V. 2005 Modélisation numérique temporelle d'un contact frottant - Mise en évidence d'instabilités locales de contact et conséquences tribologiques *Thèse de doctorat* INSA Lyon.
- Qiao, S.L., Ibrahim, R.A. 1999 Stochastic dynamics of systems with friction-induced vibration. *Journal of Sound and Vibration* **223** 115-140
- Soize, C. Méthodes mathématiques en analyse du signal. Paris.
- Thirion-Moreau, N., Arques, P-Y. Analyses temps-fréquence linéaires et quadratiques. *Techniques de l'Ingénieur* **TE 5 240** 26p.